

## 窒素酸化物排出低減用触媒技術の開発動向

近年の日本の大気汚染の状況を見ると、硫黄酸化物濃度は改善されているが、都市部の窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）濃度はほとんど改善されていない。NO<sub>x</sub>は近年増加している光化学オキシダントの原因物質でもあることから、今後に対策技術の開発は重要な課題である。NO<sub>x</sub>をはじめとする、自動車や工場の排出ガス浄化に使用され、我々の健康保持に重要な役割を果たしているのが触媒である。

日本では大気中のNO<sub>x</sub>の半分以上が自動車から排出されており、自動車のNO<sub>x</sub>対策が極めて重要である。このため、日本の自動車のNO<sub>x</sub>排出規制は年々強化されている。ガソリン自動車のNO<sub>x</sub>対策には、従来三元触媒が用いられてきた。しかし近年開発されたリーンバーンエンジンには適用できないため、新たな触媒システムの開発が進められている。さらに、ディーゼル自動車についても新たなNO<sub>x</sub>対策触媒技術の開発が進められている。これらの分野で日本は欧米に先行した技術を有しており、産学官の共同プロジェクトも実施され、成果を上げている。

固定発生源の場合、大型の発電設備などはアンモニア脱硝装置などによりNO<sub>x</sub>が抑制されており、その技術は日本が世界をリードしている。一方、コージェネレーションなどの小型の発電設備を対象として、米国ではアンモニア脱硝装置に代わる新技術が実用化されている。

環境対策触媒技術の課題として、稀少資源の保護の観点から、自動車用触媒に使用される貴金属量の抑制が挙げられる。また、エネルギーおよび環境問題およびCO<sub>2</sub>排出量の削減に寄与するために、ガソリン以外の燃料に対応する自動車排出ガス浄化触媒の開発が必要となる。さらに、コージェネレーションなどの小型発電設備の普及に応じて、小型設備用低NO<sub>x</sub>排出技術の開発も必要となる。

これらの課題に対して、環境触媒技術の開発を促進するために以下の提言を行う。

- ①触媒の貴金属使用量の削減に向けて、SPRING-8のような最先端の大型分析設備を活用し、それらに高度な知見を有する大学や機関が企業と連携して研究を推進する。
- ②貴金属のリサイクルを促進するために、発展途上国の廃棄自動車および貴金属の回収事業を支援する。
- ③エネルギー問題への対応に結びつく環境触媒技術として、ディーゼル、バイオマス、圧縮天然ガス（CNG）などを燃料とする、自動車に対する排出ガス浄化技術の開発および基礎研究の促進を図る支援を行う。また、世界に先駆けて実用化したプラズマ技術と、触媒を使用したハイブリッドタイプの新排出ガス浄化システムの開発を進めることによって、排出ガスの浄化に必要なエネルギーが節減可能となることが示唆される。

# 窒素酸化物排出低減用 触媒技術の開発動向

小沢 靖  
客員研究官

浦島 邦子  
環境・エネルギーユニット

## 1 はじめに

触媒は、ガソリンなどの燃料の精製、衣服、自動車、電気製品、家庭用品などに使われる化成品の合成、医薬品の製造などに不可欠のものであるが、自動車や工場の排出ガス浄化などの環境対策にも使用されており、我々の健康保持にも重要な役割を果たしている。触媒とは、反応前後でほとんど変化せず、少量で反応速度を変化させる物質のことを言う。反応の促進効果以外に選択効果もあり、同じ原料で複数の反応が存在する場合、触媒の種類によって、それぞれ特定の反応を選択的に促進することができる。固体表面が反応を促進する作用は1817年にイギリスのDavyによって初めて見出され、1913年のドイツのHaberおよびBoschの技術に基づいた低温アンモニア合成法の工業化以降、

触媒を用いた種々のプロセスが開発され<sup>1)</sup>、産業の発展および環境の保全に寄与している(図表1)。触媒の種類および形態は多種多様であり、固体ばかりでなく硫酸などの液体も触媒として機能する場合がある。固体触媒においては、単独で使用する場合もあり、セラミックスなどの材料(触媒の担体と言う)の表面に微粒子

状に分散固着(担持と言う)して使用する場合もある。形状は粉末、顆粒、繊維状、板状、ハニカム型など様々で、反応に適した構造が選定される。

本稿では、移動発生源および固定発生源に設置されている窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)排出低減用触媒技術の現状を概説し、今後開発を進める上での課題について提言する。

図表1 触媒の一覧

区分	用途	代表的触媒
工業用	石油精製用	クラッキング触媒、水素化分解・脱硫触媒、改質触媒
	石油化学製品製造用	水素化触媒、酸化触媒、重合触媒
	医薬・食品用	水素化触媒、酸化触媒、異性化触媒
	その他	天然ガス改質触媒、燃料電池電極触媒
環境保全用	自動車排出ガス浄化用	三元触媒、PM酸化触媒
	その他	脱硝触媒、ダイオキシン・VOC分解触媒、脱臭触媒、光触媒

## 2 大気汚染とNO<sub>x</sub>排出規制の状況

2 - 1

### 日本における現状

大気汚染物質は自動車、船舶、航空機などの移動発生源と工場、発電所、ごみ焼却場などの固定発生源から排出される。日本における大気汚染物質濃度の状況は、す

でに2005年7月の科学技術動向誌に報告されているが<sup>2)</sup>、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)や一酸化炭素(CO)濃度は著しく改善されているのに対し、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)はほとんど改善されておらず、NO<sub>2</sub>が一因とされる光化学オキシダントは近年増加傾向にある。

2002年度の環境省・国土交通省

のパフレットによると、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の52%が自動車から、35%が工場・事業場からそれぞれ排出されており、自動車のNO<sub>x</sub>対策が重要となる。ディーゼル重量トラックとバスからのNO<sub>x</sub>排出量の推移を図表2に示す。1974年に排出された量を100%とすると、98年度規制では20%以下と

なっていることからわかるように、排出量は年々削減している<sup>3)</sup>。

日本における自動車のNO<sub>x</sub>排出規制は世界で最も厳しいレベルで推移している。大都市地域を中心としたNO<sub>x</sub>による大気汚染については、旧自動車NO<sub>x</sub>法（1992年制定）に基づく規制などの諸施策が実施されてきた。しかし、自動車交通量の増大などの理由により、都市部におけるNO<sub>2</sub>の大気環境基準の達成率は改善されていない<sup>4)</sup>。一方、粒子状物質（PM）による大気汚染も厳しい状況にあり、特にディーゼル自動車から排

出されるPMについては、発ガン性のおそれがある物質として、国民の健康への悪影響が懸念されている。このため、NO<sub>x</sub>に対する従来の施策を強化するとともに、自動車交通に起因するPMの削減を図るため、自動車NO<sub>x</sub>法の改正法案が、2001年6月に成立した。これにより、排出を規制する物質にNO<sub>x</sub>だけでなくPMが追加され、また、対策地域を拡大するとともに、現に使用されているディーゼル自動車の排気ガス規制が段階的に強化されている。これらの規制をクリアするために、燃料の

高純度化、エンジン及び排ガス浄化触媒の高性能化が進められている<sup>5～10)</sup>。

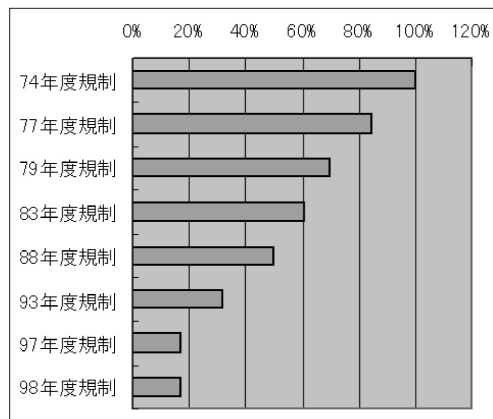
固定排出源についても、日本では小規模のものを除き、国の法令および都道府県の上乗せ基準によって、設備の種類および規模毎にNO<sub>x</sub>排出濃度が規制され、特定地域では総量も規制されており、規制強化が図られている。さらに、大規模な設備の新・増設については国や都道府県による環境影響評価（環境アセスメント）が実施されており、NO<sub>x</sub>対策などの環境保全措置が審査されている。

2 - 2

## 米国における現状

米国では光化学オキシダントの主成分であるオゾン、およびPMに加えてCOの大気環境基準の未達成地域が多く、また、大気中NO<sub>x</sub>、CO濃度への自動車の影響が大きい。このため、日本と同様に自動車の排出ガス規制を強化しており、2007年以降にも規制強化を予定している。なお欧州も同様に、年度や内容は未定だが今後も厳しい規制を予定している<sup>11)</sup>。図

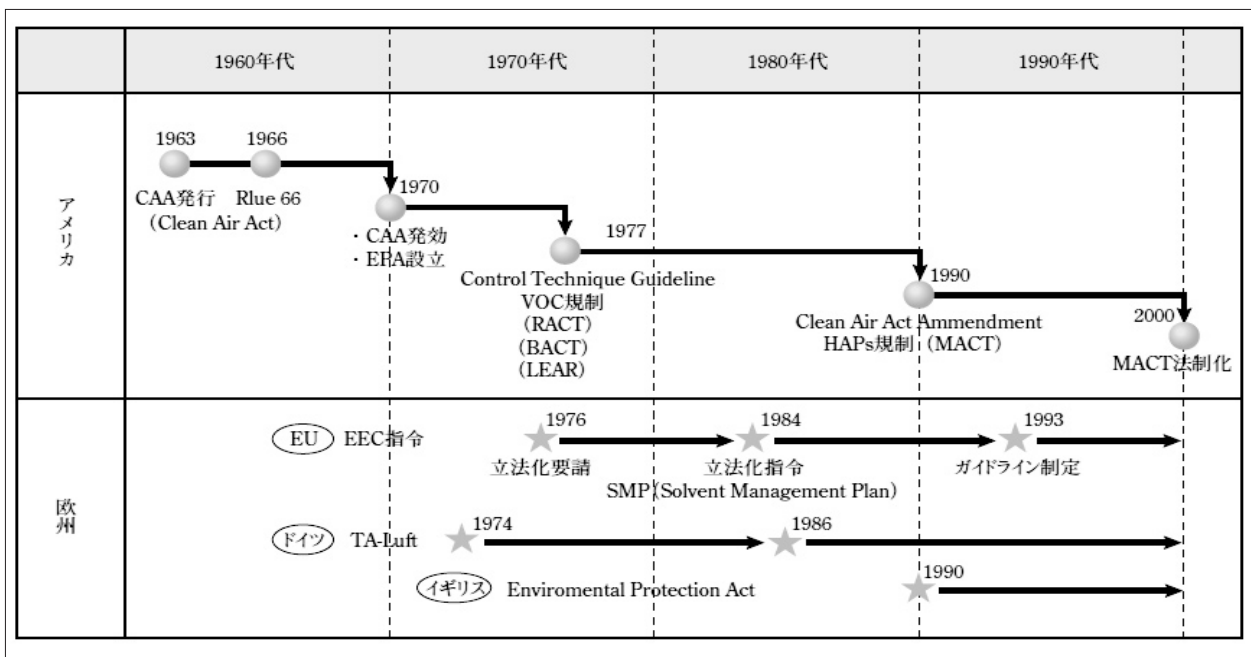
図表2 ディーゼルトラック・バスのNO<sub>x</sub>排出量低減効果の推移（直接噴射式）



(注) 車両総重量：1.7～2.5トン

資料：「道路ポケットブック」1999年全国道路利用者会議

図表3 米国と欧州の環境規制法の経緯



参考文献<sup>11)</sup>より



表3に米国と欧州の環境規制法の経緯を示す。

固定排出源について、米国では図表4に示されるような多くのNO<sub>x</sub>排出規制が実施されているが、近年排出権取引制度を取り入れて、排出規制によって経済発展を阻害しないような配慮も行っている。NO<sub>x</sub>排出権取引とは、各

設備に年間に排出できるNO<sub>x</sub>の総量を排出権として割り当て、実際に排出する量との差の排出権を売買したり貯蓄したりできる制度のことで、排出権の割り当てを徐々に削減していくことによってNO<sub>x</sub>の低減を図るものである<sup>12)</sup>。新技術の導入などによって割り当て以上にNO<sub>x</sub>排出量を削減すれ

ば、その分の排出権の販売が可能になるため、経済的に低NO<sub>x</sub>新技術の導入が可能になる。しかし、この制度においても、適切な運用を行わないと経済発展への影響を生じる。例えば、カリフォルニア州では1993年からNO<sub>x</sub>排出権取引を開始しているが、2000年には排出量が割当量を超過する事態となり、排出権が急騰して発電所の停止もたらした<sup>13)</sup>。また、排出権を購入すればその設備から割り当て以上にNO<sub>x</sub>を排出できるので、局所的な大気環境の悪化を招く恐れもある。

設備の新設および大規模な改造時には、図表5に示すような基準を考慮し、排出基準を満たす機器の導入が求められる<sup>14)</sup>。例えば、BACTでは、大気環境基準を満たしている地域において、新規設備を導入するに際し、基準汚染物質すべてを除去できる性能を持ち、かつランニングコストを含めた費用がリーズナブルな設備の導入が求められている。また、LAERは、大気環境基準を満たしていない地域で新規設備を導入する場合に指針となる基準である。これは、例えばガスタービン発電設備を新た

図表4 固定発生源からのNO<sub>x</sub>排出量に関する規制

年代	規 制	概 要
1970 ～	Clean Air Act (CAA)	米国において1970年に成立した連邦法。
1995 ～	Acid Rain Program	SO <sub>2</sub> とNO <sub>x</sub> の排出量を減少させ、酸性雨を抑制することを目的とする。経済的手法により目標を達成することをめざしており、SO <sub>2</sub> は排出権取引を実施中。このプログラムでは、エネルギー効率の改善や関連した公害防止も奨励。
1999 ～	Ozone Transport Commission (OTC) NO <sub>x</sub> Budget Program	東部12州における約900の火力発電ユニットと約100の蒸気ボイラーが主な対象。オゾン・シーズン（5～9月）における排出総量の上限は1990年の排出量をベースに設定され、この範囲内で対象発生源に排出上限を割り当て、排出権取引を実施。使用しなかった排出許可量については、売却または持ち越しも可能。
2004 ～	NO <sub>x</sub> State Implementation Plan (SIP) Call	上記OTC NO <sub>x</sub> Budget Programをベースに、東部22州とワシントンDCにNO <sub>x</sub> 排出権取引を行う範囲を拡大している。
2005 ～	Clean Air Interstate Rule (CAIR)	東部28州とコロンビア特別区にある石炭火力発電所から放出されるSO <sub>2</sub> とNO <sub>x</sub> の排出を、10年間で大幅な削減が目的。
検討中	Clear Skies Act	発電によるSO <sub>2</sub> とNO <sub>x</sub> 及び水銀の排出に上限を設け、排出量を劇的に減少させ、2000年の水準より70%削減する強制力をもつ法律。

図表5 新規および一部の既存固定発生源に対する排出基準

対象物質	発生源	基準名	排出基準対象地域	概要
基準汚染物質 (NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub> 、CO、オゾン、鉛、PMの6物質)	新規	BACT (Best Available Control Technology)	6物質すべて連邦大気環境基準を達成	NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub> 、CO、VOC、鉛、PMの6物質のうちいずれかを、特定の категория ーでは100t/年以上、それ以外では250t/年以上排出する事業所が対象（大規模発生源）となる。同種の新規発生源に適用されるNSPSと同程度に厳しいものでなければならないとしている。
		LAER (Lowest Achievable Emission Rate)	1物質でも連邦大気環境基準を未達成	NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub> 、CO、VOC、PMの5物質を100t/年以上排出する事業所が対象（新規発生源）となる。最も厳しい水準となる。
			オゾン、PM10の連邦大気環境基準が未達成	
		NSPS (New Source Performance Standards)	6物質すべて連邦大気環境基準を達成	対象となる種類は、鋼鉄プラント、鉛・亜鉛・同精錬所、ゴム、タイヤ製造工場などである。特定の種類の新規発生源が対象。上記の category ーに属する工場は、施設の規模に関係なく対象となる。既存発生源よりも厳しい水準となる。
			1物質でも連邦大気環境基準を未達成	
			オゾン、PM10の連邦大気環境基準が未達成	
	既存	RACT (Reasonably Available Control Technology)	既存発生源（オゾン、PM10の連邦大気環境基準が未達成）	VOCを年間一定量以上排出する既存の事業所が対象となる。対象となる排出量は、オゾンによる汚染状況により異なる。ちなみに、最も汚染がひどい場合は、10t/年以上排出する事業所が対象となる。

※これらの基準は、いずれも改正大気清浄法（CAAA：Clean Air Act Amendments 1990）に基づく排出基準として適用。

参考文献<sup>14)</sup>

に建設する場合、既存のガスタービン発電設備が現在排出している汚染物質の最低濃度を達成できる環境対策技術の採用を要求するものである。しかし、例えば石炭火力発電所がボイラーなどの設備を

入れ替える場合、環境対策設備にかかるコストが入れ替え全費用の20%未満の場合には、環境対策設備が不必要となることから、実際は環境浄化にどの程度効果があるか疑問視されている<sup>15)</sup>。

また米国環境保護庁（EPA）では、民間企業で開発された実用段階の環境浄化技術について、実証試験による評価を実施しその評価結果を公表するという、環境技術実証事業を行っている<sup>16, 17)</sup>。

### 3 NOx 低減用触媒技術

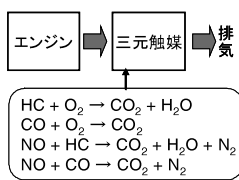
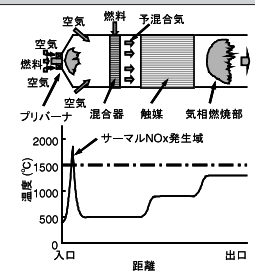
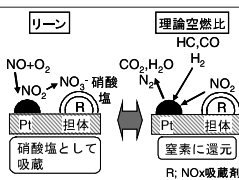
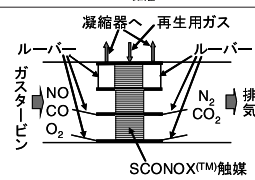
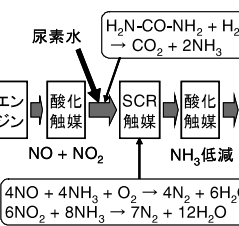
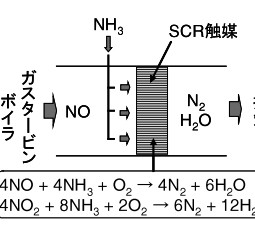
以前からガソリン自動車のNOx除去対策として三元触媒が用いられてきたが、近年開発されたリーンバーンエンジンやディーゼルエンジンには適用できないため、新たな触媒システムの開発が進められている。また、固定発生源に対してはアンモニア脱硝装置が優れた効果を発揮しているが、それに代わる新技術も開発されている。図表6に主なNOx低減用触媒技術を示す<sup>18～21)</sup>。

移動発生源用（自動車用）触媒

三元触媒は、排出ガスに含まれるCO、炭化水素（HC）およびNOを同時に除去できることから、その名前が付いている。1971年にフォード社がこの現象を見出し、1977年にトヨタ自動車が世界に先駆けてこのシステムを搭載した自動車を発売した<sup>22)</sup>。触媒はセラミックスまたは合金製ハニカムに、酸化アルミニウム（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）を主体とした高比表面積の担体をコ

ーティングし、その表面に触媒活性成分である白金（Pt）、パラジウム（Pd）およびロジウム（Rh）などの超微粒子を分散担持した構造をとる。三元触媒は燃料中の硫黄（S）成分によって被毒されて劣化する問題がある。また、三元触媒に関わらず、排出ガス浄化に使用される触媒は高温で使用されるために、熱劣化の防止も重要な課題となっており、自己再生型触媒の開発などが行われている<sup>23)</sup>。近年、熱効率が高く燃費を向上できるリーンバーンエンジンが普及し始めているが、このエンジンには三元触媒は使用できない。そこでNOx

図表6 NOx 低減用触媒技術一覧

移動発生源対策			固定発生源対策		
種類	特徴	模式図	種類	特徴	模式図
三元触媒	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガソリン車に適用</li> <li>当量付近で反応</li> <li>代表的触媒：<math>\text{Pt} - \text{Pd} - \text{Rh} - \text{Al}_2\text{O}_3</math></li> </ul>		触媒燃焼	<ul style="list-style-type: none"> <li>天然ガス焼きガスタービン燃焼器に使用</li> <li>低NOx燃焼が可能</li> <li>代表的触媒：<math>\text{PdO} - \text{Al}_2\text{O}_3</math></li> </ul>	
NOx吸蔵還元触媒	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガソリン車、ディーゼル車に適用</li> <li>燃料希薄条件で反応可能</li> <li>代表的触媒：<math>\text{Pt} - \text{Ba} - \text{Al}_2\text{O}_3</math></li> </ul>		NOx吸蔵還元触媒	<ul style="list-style-type: none"> <li>天然ガス焼きガスタービンに適用</li> <li>アンモニアが不要</li> <li>代表的触媒：酸化触媒 - <math>\text{CaCO}_3</math></li> </ul>	
選択還元触媒	<p>尿素 - SCR：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>大型ディーゼル車に適用</li> <li>燃料希薄条件で反応可能</li> <li>代表的触媒：<math>\text{V}_2\text{O}_5 - \text{TiO}_2</math></li> </ul> <p>HC - SCR：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ガソリン車に適用</li> <li>代表的触媒：<math>\text{Ir} - \text{BaSO}_4</math></li> </ul>		選択還元触媒	<p><math>\text{NH}_3</math> - SCR：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>各種燃料用ボイラ、ガスタービンに適用</li> <li>代表的触媒：<math>\text{V}_2\text{O}_5 - \text{TiO}_2</math></li> </ul>	

参考文献<sup>18～21)</sup>を基に作成

吸蔵還元触媒がリーンバーンエンジンへ適用されている。トヨタ自動車が1994年にこの触媒システムを搭載したガソリン自動車を発売した<sup>22)</sup>。また、この触媒を多孔質セラミックフィルタの表面に担持して、ディーゼル自動車からのNO<sub>x</sub>とPMを同時に削減できる触媒も開発されている<sup>24)</sup>。この触媒システムは三元触媒と同様に、被毒と熱によって劣化するため、これらの対策が課題とされている。

選択還元触媒(SCR触媒)もリーンバーンエンジンに適用でき、炭化水素を還元剤として選択的にNO<sub>x</sub>を除去(脱硝)できることを示した論文が1990年に発表されている<sup>25)</sup>。また、尿素を還元剤として使用する脱硝システムが、ディーゼル自動車を対象に検討されている<sup>19)</sup>。この技術の課題としては、排出ガス処理システムの下流に設置された酸化触媒によるNO<sub>x</sub>などの生成・排出防止、および低負荷走行時におけるNO<sub>x</sub>除去率の向上が挙げられる。また、現状のシステムでは大きな設置スペースを必要とするため、小型化も課題となる。この尿素脱硝システムを搭載した大型トラックが、2004年11月に世界に先駆けて日産ディーゼル工業から発売さ

れた<sup>26)</sup>。現在、尿素脱硝技術を用いた自動車の普及を見込み、尿素水の供給ステーションの整備も進められている。

以上に示したように、日本は欧米に比べ優れた排出ガス浄化技術を有している。また、自動車業界と石油業界を包含した産学官の共同プロジェクトであるJapan Clean Air Program(JCAP)が1997年から開始され、排出ガス浄化触媒への燃料中硫黄性分の影響に関する評価結果が、2005年からのガソリンや軽油の硫黄分規制の参考にされるなどの成果を上げている<sup>27)</sup>。

### 3 - 2

## 固定発生源用触媒

アンモニア脱硝技術は、中部電力/石川島播磨重工業が1979年に大型油焚きボイラー用として世界で初めて実用化した技術である<sup>28)</sup>。排出ガス中にNH<sub>3</sub>を注入して効率的にNO<sub>x</sub>を除去する技術である。触媒としては、担体にTiO<sub>2</sub>、活性成分に酸化バナジウム(V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)を用いたハニカム型が主に用いられる。

天然ガスまたは低硫黄軽油用ガスタービンの排出ガスの浄化にNO<sub>x</sub>吸蔵還元触媒を適用

した技術を、米国のGoal Line Environmental Technologies(現EmeraChem)社が1996年に実用化した<sup>20)</sup>。この技術はアンモニアを使用しないため、アンモニアの貯蔵、管理、リーク防止などの問題を発生しない。課題としては、触媒の長寿命化およびコスト低減が挙げられる。

以上に紹介した自動車用および固定発生源用NO<sub>x</sub>排出低減技術は、燃焼時に発生したNO<sub>x</sub>を後処理によって低減する技術であるが、燃焼時にNO<sub>x</sub>そのものを生成させない技術として、「触媒燃焼」がある。通常の火炎燃焼では、高温の火炎によって空気中の窒素と酸素が反応してNO<sub>x</sub>を生成するが、このシステムでは1,500℃以上の高温域にならないため、超低濃度NO<sub>x</sub>発生燃焼が可能である。触媒活性成分としては酸化パラジウム(PdO)が主に使用される。米国のCatalytica社と田中貴金属工業がガスタービンに適用可能な触媒システム<sup>29)</sup>を開発し、そのシステムを用いた天然ガス用ガスタービンを、川崎重工業が2002年に世界で初めて米国で実用化した<sup>30)</sup>。課題としては、高温・大型ガスタービンへの適用や、軽油などへの適用が挙げられる。

## 4 環境対策用触媒技術の開発を進めるための課題

### 4 - 1

## 触媒の貴金属使用量の問題

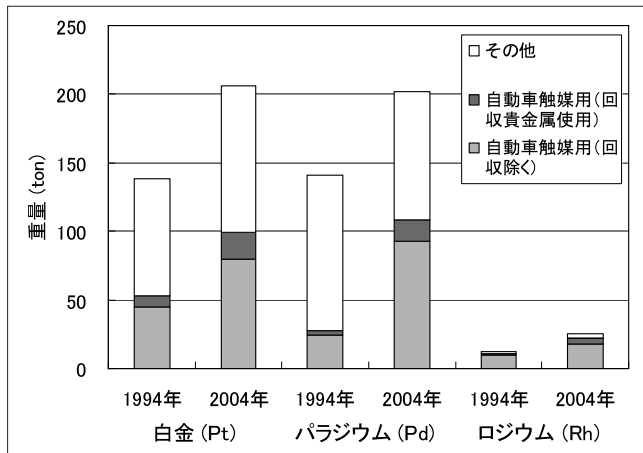
自動車用触媒は、化学工業用触媒などと比較して貴金属を多用している。図表7にPt、PdおよびRhの使用量を示す<sup>31)</sup>。Pt、Pdの約5割、Rhの約9割が自動車用触媒に使用されている。さらに、自動車触媒用貴金属の使用量は10年前と比べてPtは約2倍、Pdは約4倍に増えている。図表8に、

日本における自動車1台当たりの触媒用貴金属量(Pt+Pd)の推移とNO<sub>x</sub>排出規制値の関係を示す<sup>31)、32)</sup>。なお、本図は自動車触媒用に購入される貴金属量に基づいており、その中には在庫用も含むため、実際に自動車に使用される貴金属触媒量は、より少ない値となる。しかし、排出ガス規制の強化に伴い、浄化性能を向上するために必要な自動車1台当たりの触媒用貴金属の量が増えており、このことが自動車触媒用貴金属の全

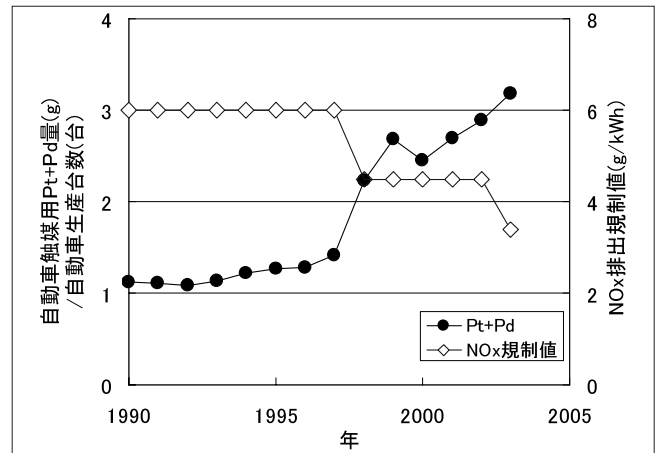
体の使用量を増加させる一因となっている。さらに、現在盛んに自動車用および分散型電源用に固体高分子型燃料電池の研究開発が進められているが、その電極触媒にも貴金属が使用されている。また上述したように、固定発生源の環境対策にも貴金属触媒を用いた技術が検討されている。貴金属は稀少資源であるとともに、その約9割がロシアおよび南アフリカから産出されており、産出地域が偏在しているために供給がその国の情



図表7 世界の貴金属使用量の比較（全体および自動車触媒用）

参考文献<sup>31)</sup>のデータを基に作成

図表8 日本における自動車1台当たりの自動車触媒用貴金属量の推移とディーゼル自動車NOx排出規制値

参考文献<sup>31, 32)</sup>のデータを基に作成

勢などの影響を受けやすい。これらの課題に対し、貴金属のリサイクル促進、自動車会社と採掘会社との直接取引による採掘計画の調整などにより、供給および価格の安定化が図られている。また、貴金属使用量低減に向けた触媒開発も以前より続けられている。さらに、自動車用燃料の低硫黄化も図られており、触媒の寿命延伸につながるため、触媒の貴金属使用量の低減に有効と考えられる。

貴金属のリサイクルについては、従来以上にさらに促進する必要があるが、廃棄触媒からの貴金属回収技術は確立しており、今後は回収システムの効率化を図る必要がある。以前、自動車は使用後の不法投棄、スクラップとして回収されないケース、および海外に廃棄自動車として輸出されるケースがあり、自動車用触媒の回収率低下の一因となっていた。しかし、日本では2005年から「使用済自動車の再資源化等に関する法律」（自動車リサイクル法）が本格的に施行され、リサイクルの促進が図られている。2005年以前に購入された自動車は、廃棄する際に廃棄費用を支払わなければならないことから、回収率の低下が危惧されているが<sup>33)</sup>、今後は自動車購入時に廃棄費用が上乗せされることから触媒に使用されている貴金属

の回収率向上が見込まれている。

#### 4 - 2

### エネルギーや環境問題への環境触媒技術の対応

エネルギーや地球温暖化の問題に対処するために、日本では1998年の「エネルギー使用の合理化に関する法律」（省エネ法）の改正<sup>34)</sup>によって、自動車の燃費向上が進められているが、CO<sub>2</sub>排出量にカウントされないバイオエタノールのガソリン混和やバイオディーゼルの軽油混和、燃料の天然ガスおよび軽油への転換などによっても、自動車からのCO<sub>2</sub>排出量の低減が可能である。

軽油はガソリンと比べ、少ないエネルギーで原油から精製でき、原油から軽油1kgを精製する際に発生するCO<sub>2</sub>は、原油からガソリン1kgを精製する場合の半分以下である<sup>35)</sup>。加えて、走行時のCO<sub>2</sub>排出量も軽油はガソリンと比べて距離あたり約1割少ないとの試算もあり<sup>36)</sup>、ディーゼルエンジンと電気モーターとのハイブリッド化を行えば、さらにCO<sub>2</sub>排出量を低減できる可能性がある。しかし一方、ディーゼル自動車から排出されるPM、NO<sub>x</sub>などの濃度はガソリン自動車と比べて高いという問題がある<sup>7)</sup>。

また天然ガスを燃料としてタンク内に圧縮充填して利用するCNG（Compressed Natural Gas）自動車の利用が進められているが、一充填当たりの走行距離が短いことから近距離の交通手段として考えられている。CO<sub>2</sub>排出量は軽油と同等か多少劣る程度と見積もられている。エンジンの熱効率を向上するために、リーンバーンエンジンの適用が必要であり、それに適応する排出ガス浄化触媒の開発が課題となっている。バイオマス燃料の利用については、排出ガスの環境への影響について十分検討されておらず、その分析が必要とされている<sup>7)</sup>。

#### 4 - 3

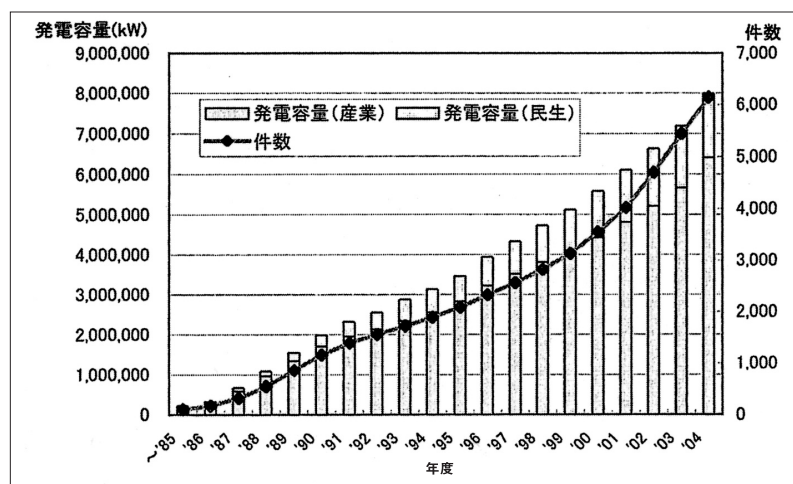
### コージェネレーションの普及に伴う課題

日本におけるコージェネレーションの設置実績を図表9に示す<sup>37)</sup>。日本では、省エネルギーや二酸化炭素抑制、そして緊急時のバックアップ用電源を目的として、特に都市部を中心にコージェネレーションシステムの導入が積極的に進められている。112.5MW未満のコージェネレーション設備は環境アセスメントから除外されており、図表10に示すように、東京都などでは小型の原動機は

どNO<sub>x</sub>排出基準を緩く設定している<sup>38)</sup>。さらに、NO<sub>x</sub>の総量規制も燃料の使用量が少ない設備ほど緩い。その結果、大型の火力発電所と比較して、小型のコージェネレーション設備はより高濃度のNO<sub>x</sub>を排出する。例えば、東京都内に設置されたコージェネレーション設備における発電電力量当たりのNO<sub>x</sub>排出量は0.81g/kWhで、対象地域の電力会社の全電源平均の約8倍、火力発電所平均の約4倍になるとの報告もある<sup>39)</sup>。今後もコージェネレーション設備の普及は拡大すると予想されることから、将来、コージェネレーション設備のNO<sub>x</sub>対策強化が必要になることが見込まれる。コージェネレーションなどの小型発電システムへのアンモニア脱硝設備の設置は、毒性ガスであるアンモニアの貯蔵・管理、広い設置スペース、リークアンモニアの監視・管理を必要とすることなどの点で、大型発電設備などへの付設と比べて不利である。このため、小型の発電システムに最適な技術の開発が急務である。

我が国は環境規制により環境浄化が進み、環境対策技術の開発も促進されてきた。特に、ガソリン自動車とともに、工場や発電所などの大型施設の環境対策は、現在世界で最も進んでいる状況である。環境規制によって環境浄化を進める手法は直接的であり、効果が最も期待できる。しかし、規制値を指標にして環境対策技術の開発を行う場合、規制値以上の高性能化を行っても、開発費の増加などによって装置の価格が上昇したり、新技術で実績が無いために信頼性に不安を持たれたりすると導入が進まないことから、新技術の開発・実用化を阻害する場合もある。例えば、排出NO<sub>x</sub>濃度の規制値が10ppmの場合、5ppmをクリアできる技術を開発しても、10ppmをクリアできる技術より

図表9 コージェネレーションの年度別設置推移（日本、累計）


参考文献<sup>37)</sup>

図表10 国および自治体のNO<sub>x</sub>排出基準の例（ガスタービン）

単位：ppm (O<sub>2</sub> = 16%)

2005年現在

規模		東京都指導要綱		大気汚染防止法
		第一種地域	第二種地域	全国
気体燃料専焼	50,000kW 以上	10	10	70
	2,000kW 以上	25	35	
	2,000kW 未満	35	50	
液体燃料専焼	50,000kW 以上	10	10	
	2,000kW 以上	25	50	
	2,000kW 未満	35	60	

注：規制対象は燃料消費量が重油換算 501/h 以上の設備

第一種地域：23区、武蔵野市、三鷹市、調布市、旧保谷市、狛江市

第二種地域：第一種以外の地域

資料を基に作成

値段が高いと、その技術を購入するユーザーはほとんど現れない。

米国では環境技術実証事業やNO<sub>x</sub>排出権取引などの制度によって、NO<sub>x</sub>対策新技術に対してEPAや州が開発競争や導入促進につながる種々の施策を行っており、特にBACTやLAERの規制を受ける施設では、より性能の高い環境浄化技術の導入が求められる。このことが、NO<sub>x</sub>排出低減技術の発展に寄与し、また経済的インセンティブを与えていると考えられる。一方、日本でも環境技術の開発・導入支援として、環境技術実証モデル事業や<sup>40)</sup>、環境アセスメントへのBACTの考え方の導入<sup>(注1) 41)</sup>、および排出ガス規制の対象外となっている給湯機器などの小規模燃焼機器を対象にした、NO<sub>x</sub>排出ガイドライン適

合機器の普及促進事業が始まっている<sup>8)</sup>。しかし、環境技術実証モデル事業は2003年度に開始されたばかりで、対象技術が限られている。また、環境アセスメントは大規模設備を対象としており、小型設備は対象外である。さらに、NO<sub>x</sub>排出ガイドライン適合機器も対象が限られており、例えば小型の非常用発電機などは対象になっていない。

(注1) 環境影響評価の際に、事業者が実行可能な範囲で環境影響を回避・低減しているかを評価するため、実行可能なより良い技術が導入されているか否かを検討することが盛り込まれた。



## 5 環境改善に向けた環境触媒に関する諸課題への提言

前章で述べた課題を基に、日本の環境触媒技術の発展を図るために、以下の提言を行う。

(1)貴金属使用量削減に向けた  
技術開発の促進

従来から貴金属担持量の削減に向けた触媒の開発は続けられてきたが、触媒反応は原子・分子レベルの複雑な反応であるため、その解析は難しく、触媒の開発は経験に基づく試行錯誤的な方法や網羅的に性能評価する方法が主に採られてきた。しかし近年、分析装置の高度化によって反応や劣化のメカニズム解明が可能になりつつあり、計算機シミュレーションもそれらの解明に役立つレベルになってきている。例えば、前述した自己再生型触媒では、Pdの超微粒子の成長が抑制されるメカニズムが高輝度光科学研究センター(SPring-8)の放射光X線解析装置によって明らかとなり、Pdの使用量を従来の70～90%削減できる結果を得た<sup>23)</sup>。このようにメカニズムの解明によって、他の貴金属についても使用量の削減が期待される<sup>42)</sup>。シミュレーションについても、分子レベルのシミュレーションを用いた反応機構の解明による触媒探索<sup>43)</sup>や、 $\mu\text{m}$ レベルのシミュレーションを用いた触媒シンタリングプロセスの解明<sup>44)</sup>などが進められている。高度な分析機器やシミュレーションの活用などによって、触媒の開発を効率的に進めることができ、触媒の貴

(注2) 発展途上国に対し、わが国の公害防止技術などを活用しつつ、各国のエネルギー環境対策における自助努力を支援する事業のこと。

金属使用量低減に貢献できる可能性がある。つまり、最先端の分析設備を使用することにより、未知のメカニズムが明らかとなり、従来困難であった技術のブレークスルーを図れる可能性がある。よって企業や大学などが導入困難な大型の設備については国が導入を図る必要がある。また、SPRING-8のような高度な分析機器は測定操作および結果の解析が困難である。そこで、測定技術に高度な知見を持つ大学や機関が、触媒開発を行う企業と連携して研究を行うことによって、効果的な開発を図れる可能性がある。さらに、自動車用触媒の非貴金属化については、直ちに実用に結びつく開発は難しく、基礎的な研究が中心となるため、大学および公立の機関で研究を進める必要がある。

## (2) 貴金属のリサイクル率の向上

自動車リサイクル法を確実に運用し、自動車の不法投棄などを防止して、廃棄触媒の回収率を向上する必要がある。また、海外に輸出される自動車に対しては、輸出先での廃棄触媒の回収システムの構築が望まれ、特に発展途上国での回収システムの確立が効果的と思われる。このため、政府が行っているグリーンエイドプラン<sup>(注2) 45)</sup>などを活用し、各国における廃棄自動車および貴金属の回収事業を支援する必要がある。

### (3) エネルギー問題への対応に

## 結びつく環境触媒技術の開発促進

エネルギー問題への対応およびCO<sub>2</sub>排出量の削減は緊急の課題である。ディーゼル自動車の排出ガス性状がガソリン自動車並に改善されれば、原油の使用量削減およびCO<sub>2</sub>の削減に寄与できる。また、

CO<sub>2</sub>の削減に効果のあるバイオマスおよび天然ガスの利用拡大が予想されることから、バイオマス燃料の燃焼排出ガスの評価、およびCNGやバイオマス燃料に適した排出ガス浄化触媒の開発促進も必要となる。触媒のみならず、エンジンも考慮した排出ガス浄化システムを開発する必要がある、エンジンと触媒システムの連携した開発が必要である。現在、プラズマ技術と触媒を併用したハイブリッドタイプの新排出ガス浄化システムが検討されている。プラズマを使用することにより、従来低温では作動しなかった触媒を常温で利用できる可能性がある<sup>46,47)</sup>。実際わが国では空気清浄機に光触媒とプラズマを併用した技術が実用化され、すでに世界に先駆けて一般向けに販売されている。今後このハイブリッドシステムの開発を進めることによって、排出ガスの浄化に必要なエネルギーの節減が可能となることが期待される。

#### (4)環境技術開発の発展につながる 技術競争の促進

日本が世界をリードしてきた環境触媒技術を今後もさらに発展させるためには、優れた技術の開発が利益に結びつき、開発競争を活発化させるしくみが必要である。そのためには、環境技術実証モデル事業の対象技術の拡大、および低 NO<sub>x</sub> 機器の普及促進事業の対象機器の種類および規模の拡大などが有効と考える。さらに、環境アセスメント対象外の小型設備についても、米国で実施されているさまざまな規制を日本にあった形にアレンジして導入を図ることが望まれる。また、NO<sub>x</sub> 排出権取引制度も低 NO<sub>x</sub> 排出技術の開発促進効果が期待できるが、前述し

たカリフォルニア州の停電の例に見られるような課題もあることから、日本の状況に即して適合化を図る必要がある。

## 謝 辞

田中貴金属工業株式会社の阿部昭彦氏および古川久氏に触媒燃焼技術などの情報、川崎重工業株式会社の梶田眞市氏、アルストム株式会社の森田浩太郎氏および山崎勝康氏に米国における低NO<sub>x</sub> 排出技術の状況についての情報、財団法人電力中央研究所の山本融氏にSPRING-8に関する情報を頂きました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 田中慶一、田丸謙二、「触媒の科学」、産業図書、p. 3～13 (1988年7月)
- 2) 福島宏和、「東アジアにおける大気汚染物質モニタリング」、科学技術動向 (2005年7月) : [http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt052j/0507\\_03\\_feature\\_articles/200507\\_fa03/200507\\_fa03.html](http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt052j/0507_03_feature_articles/200507_fa03/200507_fa03.html) (2005年10月16日現在)
- 3) 資料:「道路ポケットブック」、1999、全国道路利用者会議
- 4) 柴田芳昭、「JCAP からみた日本の排気規制と大気汚染防止効果について」、国際交通安全学会誌、Vol. 29、No.2、p.95～102 (2004年10月)
- 5) 「自動車 NO<sub>x</sub>・PM 法の手引き」、環境省・国土交通省(2002年8月) : <http://www.env.go.jp/air/car/pamph2/all.pdf> (2005年10月16日現在)
- 6) 「大気環境改善への取り組み」社団法人日本自動車工業会 : [http://www.jama.or.jp/safe/safe\\_eco\\_digest/safe\\_eco\\_digest\\_08.html](http://www.jama.or.jp/safe/safe_eco_digest/safe_eco_digest_08.html) (2005年10月16日現在)
- 7) 今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について(第八次答申)」、中央環境審議会 (2005年4月) : [http://www.env.go.jp/council/toshin/t07-h1702/t07-h1702\\_1.pdf](http://www.env.go.jp/council/toshin/t07-h1702/t07-h1702_1.pdf) (2005年10月)
- 8) 「環境白書」、環境省 : <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/> (2005年10月16日現在)
- 9) 「次世代低公害車の燃料及び技術の方向性に関する検討会報告書」、次世代低公害車の燃料及び技術の方向性に関する検討会 (2003年8月) : <http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0004362/1/030808teikougaisya.htm> (2005年10月16日現在)
- 10) 「平成16年度大気汚染状況について」環境省 : <http://www.env.go.jp/air/osens/> (2005年10月16日現在)
- 11) 中村茂、「環境対応塗料技術—自動車用塗料—」、塗料の研究、No.137、p.24～30 (2001年10月)
- 12) 高井幹夫、飯沼芳樹、井上寛、藤井朋広、「米国及び欧州連合(EU)における排出権取引」、海外電力、p.10～24(2003年8月号)
- 13) 「海外諸国の電力改革の現状と制度的課題」、経済産業省資源エネルギー庁 (2001年4月) : <http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0001505/> (2005年10月16日現在)
- 14) 「平成10年度実行可能なより良い技術の検討による評価手法検討調査報告書」環境省 (1999年3月) : <http://assesseic.or.jp/houkokusho/bat9903/> (2005年10月16日現在)
- 15) 浦島邦子、「科学技術政策をめぐる米国の科学者たち」、科学技術動向 No.45 (2004年12月) : [http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt045j/0412\\_03\\_feature\\_articles/200412\\_fa04/200412\\_fa04.html](http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt045j/0412_03_feature_articles/200412_fa04/200412_fa04.html) (2005年10月16日現在)
- 16) “Environmental Technology Verification Program”, U.S. Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/etv/> (2005年10月16日現在)
- 17) 「米国における環境技術実証プログラムの概要と今後の展望」、国際シンポジウム「環境管理のための技術実証事業」配布資料 (2003年2月) : [http://etv-jeic.or.jp/pdf/ab/01/us\\_j.pdf](http://etv-jeic.or.jp/pdf/ab/01/us_j.pdf) (2005年10月16日現在)
- 18) 三好直人、谷沢恒幸、竹島伸一、高橋直樹、笠原光一、「希薄エンジン用 NO<sub>x</sub> 吸蔵還元型三元触媒の開発」、Toyota Technical Review、Vol.44、No. 2、p.24～29 (1994年)
- 19) 「尿素 SCR システム技術検討会の設置について」、国土交通省 : [http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/09/091218\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/09/091218_.html) (2005年10月16日現在)
- 20) L. Czarnecki, R. Oegema, J. fuhr, R. Hilton, “SCONox™ - Ammonia Free NO<sub>x</sub> Removal Technology for Gas Turbines”, Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference, Miami Beach, Florida, IJPGC2000 - 15032 (2000. 7)
- 21) 小沢靖「触媒燃焼を利用した燃焼機器の開発動向」、日本燃焼学会誌、Vol.47、p.40～47 (2005年)
- 22) 「環境触媒ハンドブック」、岩本正和監修、エヌ・ティー・エス、p.268～274 (2001年11月)
- 23) 「自己再生機能を持つ自動車排出ガス浄化触媒により貴金属使用量を大幅に削減」、科学技術動向 (2003年7月) : [http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt028j/0307\\_02\\_topics/200307\\_topics.html](http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt028j/0307_02_topics/200307_topics.html) (2005年10月16日現在)
- 24) 「PM と NO<sub>x</sub> を同時浄化するトヨタの新触媒」、Car & Maintenance、Vol.54、No.10、p.33～35 (2000年)
- 25) 岩本正和、八尋秀典、田宇喜裕、春藤聖二、水野哲孝、「O<sub>2</sub> 及び SiO<sub>2</sub> 存在下での炭化水素による

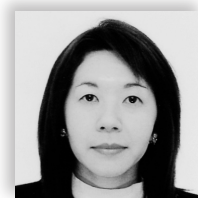
- NO の選択還元」、触媒、Vol.32、No.6、p.430～433（1990年）
- 26) 「平成17年（新長期）排出ガス規制対応技術「FLENDs」を実用化」、日産ディーゼル：  
<http://www.nissandiesel.co.jp/newsrelease/2004/1007scr.html>（2005年10月16日現在）
- 27) 小俣達雄、「JCAPIの活動概要とその成果」、日本エネルギー学会誌、Vol.82、No.5、p.242～245（2003年）
- 28) 「環境触媒ハンドブック」、岩本正和監修、エヌ・ティー・エス、p.518～524（2001年11月）
- 29) R. A. Dalla Betta, N. Ezawa, K. Tsurumi, J. C. Schlatter, S. G. Nickolas, U.S. Patent, No.5183401（1993.2）
- 30) “OEM Reationships”, Catalytica Energy Systems：<http://www.catalyticaenergy.com/xonon/oem.html>（2005年10月16日現在）
- 31) “Platinum 1999”, Johnson Matthey（1999.5）, “Platinum 2005”, Johnson Matthey（2005.5）
- 32) 「陸運統計要覧」, 「自動車輸送統計調査」、国土交通省：<http://toukei.mlit.go.jp/saisintoukei.html>（2005年10月16日現在）
- 33) 「産業構造審議会 環境部会廃棄物・リサイクル小委員会自動車リサイクルWG中央環境審議会廃棄物・リサイクル部会自動車リサイクル専門委員会 合同会議（第9回）議事要旨」（2005年7月）：  
<http://www.env.go.jp/council/03haiki/y035-09a.html>（2005年10月16日現在）
- 34) 「エネルギー使用の合理化に関する法律「省エネ法」改正」、省エネルギーセンター：  
<http://www.eccj.or.jp/law/pamph/030401/index.html>（2005年10月16日現在）
- 35) 「輸送用燃料ライフサイクルインベントリーに関する調査報告書—燃料電池車と既存自動車の比較—」、石油産業活性化センター、PEC - 2001L - 04（2002年3月）
- 36) 「クリーンディーゼル車の普及・将来見通しに関する報告書」、クリーンディーゼル乗用車の普及・将来見通しに関する検討会（2005）：<http://www.meti.go.jp/report/data/g50418bj.html>（2005年10月16日現在）
- 37) 「5. 熱エネルギーシステムの動向」、日本エネルギー学会誌、Vol.84、No.8、p.685～689（2005）
- 38) 「コージェネレーション総合マニュアル」、日本コージェネレーションセンター、通産資料調査会、p.556～565（2000年6月）
- 39) 佐藤渉、市川陽一、「東京都におけるコージェネレーションシステム起源のNOx排出量の推計」、電力中央研究所報告、T03009（2004年2月）
- 40) 「環境技術実証モデル事業」：  
<http://etv-j.eic.or.jp/index.html>（2005年10月16日現在）
- 41) 「“実行可能なより良い技術”の検討による評価手法の手引き」、環境省（2000年8月）：  
<http://assess.eic.or.jp/houkokusho/bat0003/index.html>（2005年10月16日現在）
- 42) 田中裕久、「貴金属ナノ粒子の自己再生機能を持つペロブスカイト触媒」、第96回触媒討論会A予稿集、p.198（2005年9月）
- 43) 倉本圭、久保修一、「排気浄化触媒における表面触媒反応の理論的研究と触媒設計」、第96回触媒討論会A予稿集、p.220（2005年9月）
- 44) 久保百司、石本良太、鄭昌縞、坪井秀行、小山通久、「 $\mu$ mスケールシミュレーションによる触媒シンタリングプロセスの解明」、第96回触媒討論会A予稿集、p.234（2005年9月）
- 45) 「GAP」：<http://www.meti.go.jp/topic/data/eoda300j.html>（2005年10月16日現在）
- 46) K. Urashima, J.-S. Chang, J. Y. Park, D.C. Lee, A. Chakrabarti and T. Ito, “Reduction of NOx from Natural Gas Combustion Flue Gas by Corona Discharge Radical Injection Techniques”, Trans. IEEE Ind. Appl. Soc., vol. 34, No.5, p.934 - 939（1999）
- 47) K. Urashima and J.-S. Chang, “Removal of Volatile Organic Compounds From Air Streams and Industrial Flue Gases by Non-Thermal Plasma Technology”, Trans. IEEE DEIS. Soc., vol. 7, No.5, p.602 - 614（2000）

## 執筆者



客員研究官  
**小沢 靖**  
（財）電力中央研究所  
エネルギー技術研究所  
<http://criepi.denken.or.jp/jp/index.html>

工学博士。触媒燃焼の研究に従事した後、現在、ガス化発電用クリーンアップ触媒および液体燃料の燃焼技術などを研究中。



環境・エネルギーユニット  
**浦島 邦子**  
科学技術動向研究センター  
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

工学博士。環境に影響を与える物質（排ガス、排水、廃棄物など）を無害化する研究に主に従事後、現職。